

⑯ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑯ Patentschrift  
⑯ DE 196 49 865 C 1

⑮ Int. Cl. 6:  
**B 22 F 3/105**  
B 23 K 26/00  
B 22 C 7/00

DE 196 49 865 C 1

- ⑯ Aktenzeichen: 196 49 865.1-24  
⑯ Anmeldetag: 2. 12. 96  
⑯ Offenlegungstag: —  
⑯ Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: .12. 2. 98

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

⑯ Patentinhaber:

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der  
angewandten Forschung e.V., 80636 München, DE

⑯ Vertreter:

Grimm, E., Dipl.-Phys., Pat.-Anw., 63450 Hanau

⑯ Erfinder:

Meiners, Wilhelm, 52074 Aachen, DE; Wissenbach,  
Konrad, Dr., 52134 Herzogenrath, DE; Gasser,  
Andres, Dr., 52066 Aachen, DE

⑯ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit  
in Betracht gezogene Druckschriften:

WO 92 10 343 A1  
Haferkamp, Heinz u.a.: Laserstrahl-Sintern zur  
Herstellung von Blechumformwerkzeugen. In: Blech  
Rohre Profile, 1996, H.6, S.317-319/Abschnitt 2;

⑯ Verfahren zur Herstellung eines Formkörpers

⑯ Verfahren zur Herstellung eines Formkörpers, insbesondere eines Prototyps eines Produkts oder Bauteils, eines Werkzeugprototyps oder eines Ersatzteils, entsprechend dreidimensionalen CAD-Daten eines Modells des Formkörpers durch schichtweises Aufbauen aus pulverförmigem, metallischem Werkstoff, bei dem nacheinander mehrere Pulverschichten übereinander aufgebracht werden, wobei jede Pulverschicht vor dem Aufbringen der nächstfolgenden Pulverschicht mit einem fokussierten Laserstrahl in einem vorgegebenen Bereich, der einem ausgewählten Querschnittsbereich des Modells des Formkörpers entspricht, auf eine vorgegebene Temperatur erhitzt wird und bei dem der Laserstrahl jeweils entsprechend den CAD-Querschnittsdaten des ausgewählten Querschnittsbereichs des Modells über die jeweilige Pulverschicht geführt wird, wodurch diese Pulverschicht an der darunterliegenden Schicht fixiert wird, das dadurch gekennzeichnet ist, daß das metallische Werkstoffpulver als bindemittel- und flußmittelfreies metallisches Werkstoffpulver aufgebracht wird, daß es durch den Laserstrahl auf Schmelztemperatur erhitzt wird, daß die Energie des Laserstrahls so ausgewählt wird, daß das metallische Werkstoffpulver an der Auftreffstelle des Laserstrahls über seine gesamte Schichtdicke vollständig aufgeschmolzen wird, daß der Laserstrahl in mehreren Spuren über den vorgegebenen Bereich der metallischen Werkstoffpulverschicht so geführt wird, daß jede folgende Spur des Laserstrahls die vorherige Spur ...

DE 196 49 865 C 1

## Beschreibung

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung eines Formkörpers, insbesondere eines Prototyps eines Produkts oder Bauteils, eines Werkzeugprototyps oder eines Ersatzteils, entsprechend dreidimensionalen CAD-Daten eines Modells des Formkörpers durch schichtweises Aufbauen aus pulverförmigem, metallischem Werkstoff, bei dem nacheinander mehrere Pulverschichten übereinander aufgebracht werden, wobei jede Pulverschicht vor dem Aufbringen der nächstfolgenden Pulverschicht mit einem fokussierten Laserstrahl in einem vorgegebenen Bereich, der einem ausgewählten Querschnittsbereich des Modells des Formkörpers entspricht, auf eine vorgegebene Temperatur erhitzt wird und bei dem der Laserstrahl jeweils entsprechend den CAD-Querschnittsdaten des ausgewählten Querschnittsbereichs des Modells über die jeweilige Pulverschicht geführt wird, wodurch diese Pulverschicht an der darunterliegenden Schicht fixiert wird.

Der zunehmende Wettbewerbsdruck zwingt Unternehmen in erhöhtem Maße, nicht nur bei gleichbleibend hoher Produktqualität wirtschaftlicher zu fertigen, sondern im Bereich der Produktentwicklung durch Einsatz neuer Verfahren Zeit und Kosten einzusparen. Die Produktlebenszeit verkürzt sich zunehmend. Neben der Produktqualität und den Produktionskosten ist für den Erfolg eines Produkts der Zeitpunkt seiner Markteinführung zunehmend von Bedeutung.

In vielen Industriezweigen ist es erforderlich, vor einer Serienfertigung, Prototypen zu fertigen, um sie bereits als funktionsmäßige Teile zum Testen in Versuchsanordnungen einzubauen. Vorzugsweise sollen solche Prototypen nicht nur in ihrer Form den Serienprodukten entsprechen, sondern sie sollen auch vorzugsweise in Bezug auf den Werkstoff dem Serienprodukt möglichst nahekommen, um solche Prototypen auch im Einsatz zu testen.

Aus den vorstehend genannten Gründen hat sich in den letzten Jahren eine Technologie für die vorstehend angegebenen Zwecke etabliert, die als Stereolithographie bezeichnet wird. Im Rahmen der Stereolithographie wird ein zu fertigender Prototyp datenverarbeitungsmäßig in einzelne Schichten unterteilt und die Daten der einzelnen Schichten in Bezug auf den herzustellenden Prototyp werden einer Fertigungsanordnung zugeführt. Eine solche Fertigungsanordnung besteht aus einem Flüssigkeitsbad mit einer UV-härtenden Flüssigkeit, die mit einem UV-Strahl entsprechend den Konturen und Feldern des herzustellenden Prototyps überstrichen wird, um die Flüssigkeit auszuhärten. Danach wird diese erste Schicht um eine definierte Schichtdicke abgesenkt, um darauf die zweite Schicht gemäß den erstellten Daten auszuhärten. Diese Verfahrensweise wird schichtweise fortgeführt, bis das gesamte Modell bzw. der Prototyp erstellt ist. Auf diese Art und Weise können dünne Rohrwandungen, Hohlräume oder in sich verschlungene Teile gefertigt werden, und zwar entsprechend dem Serienprodukt. Je nach dem Unterteilungsgrad der Schichten, d. h. entsprechend der Dicke jeder Schicht, die ausgehärtet wird, können auch Krümmungen sehr detailliert aufgebaut werden.

Neben dieser Stereolithographie, bei der Kunststoffmaterialien mittels UV-Licht ausgehärtet bzw. polymerisiert werden, ist auch ein Verfahren bekannt, einen Prototyp aus gesintertem, metallischem Werkstoffpulver aufzubauen. Ein solches Verfahren ist in der PCT WO 92/10343 beschrieben. Gemäß dem in dieser

Druckschrift beschriebenen Verfahren wird zur Herstellung eines Teils eine erste Schicht eines sinterfähigen Pulvers aufgebracht und das Pulver entsprechend den Schichtbereichen des herzustellenden Teils gesintert.

5 Danach wird diese Verfahrensweise wiederholt, indem jeweils weitere Schichten auf die jeweils zuvor gesinterte Schicht aufgebracht werden, die den jeweiligen Schichten bzw. Querschnittsflächenbereichen des herzustellenden Teils entsprechen.

10 Aus "Heinz Haferkamp et al, Laserstrahl-Sintern zur Herstellung von Blechformwerkzeugen", in der Zeitschrift "BLECH ROHRE PROFILE, 43, 1996, Seiten 317 bis 319" ist es bekannt, Metallstrukturen durch schichtweise lokales Sintern bzw. Verschmelzen von vordeponierten Metallpulverschichten mit fokussierter Laserstrahlung aufzubauen. Hierbei werden die Metallstrukturen aus pulverförmigen Werkstoffen ohne Bindemittelzusätze über die Schmelzphase hergestellt, wobei mehrere übereinanderliegende Metallpulverschichten mit einer Dicke von jeweils 0,1 bis 0,2 mm nacheinander aufgebracht und jeweils mit Laserstrahlung unter einer Argon-Schutzgasatmosphäre bestrahlt werden.

15 Ein gemeinsamer Nachteil der heute auf dem Markt verfügbaren Verfahren, wie Stereolithographie, Sintern von Metallpulvern, besteht darin, daß hierdurch auf direktem Weg keine metallischen Prototypen hergestellt werden können, die für einen betriebsmäßigen Einsatz, beispielsweise als Abgaskrümmer eines Kraftfahrzeugs, einsetzbar sind. Die erzeugten Bauteile bestehen aus

20 Kunststoffen, Metall, Wachs oder Papier, die betriebsmäßige Funktionsprüfungen, insbesondere unter hoher Temperatur und starken Belastungen, nicht zulassen.

25 In Bezug auf das Sinternverfahren, wie es auch aus der vorstehend zitierten Druckschrift bekannt ist, werden im wesentlichen zwei Verfahrensvarianten derzeit verfolgt, zum einen das direkte Sintern und zum anderen das indirekte Sintern. Beim indirekten Sintern wird das metallische Werkstoffpulver mit einem Polymer umhüllt oder mit einem anderen, sinterfähigen Hüllmaterial, wie

30 Sinterhilfsmittel, was für solches Metall erforderlich ist, das selbst nicht sinterfähig ist. Bei dem Sintervorgang wird nur das Polymermaterial oder das Hüllmaterial aufgeschmolzen oder gesintert und bindet dadurch die Metallpartikel zusammen. Der so erzeugte sogenannte Grüning muß jedoch noch in einem Folgeprozeß nachbehandelt werden, beispielsweise in Form einer Oberflächenglätzung oder eines Ausbrennens des Binders aus Polymermaterial. Oder es müssen meistens solche Bauteile noch durch Nachsintern und Infiltrieren verdichtet und verfestigt werden, wodurch sich Maß- und Formveränderungen durch Schrumpfung oder Verzug ergeben können. Bei der direkten Sinterung besteht die Pulvermischung aus einem niedrig- und einem hochschmelzenden Material. Bei einer Bearbeitung wird nur die niedrigschmelzende Komponente aufgeschmolzen und fungiert als Binder für die hochschmelzenden Pulverpartikel. Dieses Verfahren hat den Nachteil, daß die hergestellten Bauteile eine Dichte kleiner ca. 80% aufweisen und eine geringe Festigkeit haben. Deshalb ist

35 40 45 50 55 60 auch bei dieser Verfahrensvariante eine direkte Erprobung oder ein Einsatz des Bauteils unter betriebsmäßigen oder gar extremen Testbedingungen nicht möglich.

55 Ausgehend von dem eingangs angegebenen Stand der Technik sowie der vorstehend aufgeführten Problematik, die sich bei herkömmlichen Verfahren ergibt, liegt der vorliegenden Erfahrung die Aufgabe zugrunde, Formkörper, insbesondere Prototypen eines Produkts oder Bauteils, zu schaffen, die ein Testen unter Bedin-

gungen, die mindestens denjenigen entsprechen, denen das Serienprodukt ausgesetzt werden soll, ermöglichen, wobei diese Prototypen in ihrer Festigkeit und Dichte dem Endprodukt mindestens angenähert werden sollen und insbesondere auch keine aufwendigen Nachbearbeitungsschritte erfordern.

Diese Aufgabe wird ausgehend von dem eingangs genannten Verfahren gemäß der Erfindung dadurch gelöst, daß das metallische Werkstoffpulver als bindemittel- und flußmittelfreies, metallisches Werkstoffpulver aufgebracht wird, daß es durch den Laserstrahl auf Schmelztemperatur erhitzt wird, daß die Energie des Laserstrahls so ausgewählt wird, daß das metallische Werkstoffpulver an der Auftreffstelle des Laserstrahls über seine gesamte Schichtdicke vollständig aufgeschmolzen wird, daß der Laserstrahl in mehreren Spuren über den vorgegebenen Bereich der Werkstoffpulverschicht so geführt wird, daß jede folgende Spur des Laserstrahls die vorherige Spur teilweise überlappt, und daß eine Schutzgasatmosphäre über jeder Wechselwirkungszone von Laserstrahl mit dem metallischen Werkstoffpulver aufrechterhalten wird.

Dadurch, daß das metallische Werkstoffpulver bindemittel- und flußmittelfrei ist, und es jeweils auf seine Schmelztemperatur erhitzt wird, wird das metallische Werkstoffpulver über die gesamte Schichtdicke vollständig aufgeschmolzen, so daß ein sehr dichter Formkörper hoher Festigkeit herstellbar ist, der ein Testen unter betriebsmäßigen Bedingungen, also sowohl unter hohen Temperaturen, in Abhängigkeit von der Metallart, aus der das verwendete Pulver besteht, als auch unter hohen mechanischen Beanspruchungen zuläßt. Hierbei ist wesentlich, daß die metallische Werkstoffpulverschicht entlang der Spuren, die der Laserstrahl beim Aufschmelzen überfährt, bis zu der darunterliegenden, bereits aufgeschmolzenen Schicht durchdringt, so daß sich jeweils benachbarte Spuren derart überlappen, daß benachbarte Bereiche miteinander verschmolzen werden und somit keine Rillen oder sonstige Übergangsstellen entstehen. Durch diese Oberlappung wird die Schmelze des Pulvers und die Schmelze der angrenzenden, festen Kontur, die zuvor aufgeschmolzen wurde oder unter der Pulverschicht liegt, zu einem gemeinsamen Schmelzbad aufgeschmolzen, wonach das Schmelzbad eine schmelzmetallurgische Verbindung eingeht und dann nach der Erstarrung eine homogene Struktur entsteht.

Hierbei ist auch wesentlich, daß während des Verfahrens in der Wechselwirkungszone zwischen dem Laserstrahl und dem metallischen Werkstoffpulver eine Schutzgasatmosphäre aufrechterhalten wird, um Fehlstellen, wie sie beispielsweise durch Oxidation hervorgerufen werden, zu vermeiden. Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren können nicht nur hoch feste und sehr dichte Bauteile erzeugt werden, sondern es ist mit dem Verfahren auch, praktisch materialunabhängig, die Möglichkeit gegeben, die unterschiedlichsten metallischen Werkstoffpulver einzusetzen, beispielsweise Edelstahl, Aluminium oder Titan, um einige der wesentlichsten dieser seriennahen und im Vergleich zu bisherigen Sinterwerkstoffen hochschmelzenden Werkstoffe zu nennen, die heute eingesetzt werden; Die Pulver erfordern keine Vorbehandlungen, sondern es können handelsübliche Pulver ohne große Einschränkungen verwendet werden. Die einzige Einschränkung, die eingehalten werden muß, ist diejenige, daß das metallische Werkstoffpulver eine ausreichend feine Körnung haben sollte, um die einzelnen Schichten fein abgestuft aufbau-

en zu können.

Wie bereits vorstehend ausgeführt, ist es wesentlich, daß der Spurabstand benachbarter Spuren, d. h. der Abstand, mit dem jeweils durch den Laserstrahl aufgeschmolzen wird, so gewählt wird, daß sich die Spuren derart überlappen, daß eine folgende Schmelzspur jeweils an die vorherige Spur angeschmolzen wird, indem eine ausreichend breite Zone, auch von der bereits erstarrten Spur erneut aufgeschmolzen wird. In Bezug auf diese Maßnahme hat sich ein Spurabstand  $\Delta s$  benachbarter Spuren gemäß der Vorschrift  $2 > d_s/\Delta s > 1,5$  als bevorzugt erwiesen, wobei  $d_s$  der Durchmesser des Laserstrahls in der Schmelzebene ist. Weiterhin sollte der Durchmesser des Laserstrahls im Bereich von 0,2 bis 0,5 mm, vorzugsweise etwa 0,35 mm, liegen. Geht man von einem Laserstrahldurchmesser von beispielsweise von 0,5 mm aus und berücksichtigt die Bedingung, wie sie vorstehend angegeben ist, so überlappt jeweils der Laserstrahl mit 0,25 mm seines Durchmessers die bereits erstarrte, vorherige Spur, die dann wieder aufgeschmolzen wird.

Es hat sich gezeigt, daß ein besonders gutes Aufschmelzen und Verbinden des aufgeschmolzenen Metallpulvers mit einer bereits erstarrten und wieder aufgeschmolzenen Spur dann erzielt wird, wenn die benachbarte, erstarrte Spur noch eine ausreichende Restwärme besitzt, so daß sie schneller auf die Schmelztemperatur durch den Laserstrahl wieder aufgeheizt werden kann. Um dies zu erreichen, wird jede Schicht des schichtartigen Aufbaus des Formkörpers in Teilstücken unterteilt und jede Teilstücke wird dann wiederum in Abtastvektorlängen unterteilt, die der Laserstrahl nacheinander überstreicht. Dies bedeutet, daß sich der Laserstrahl nur eine kurze Spurlänge in einer Richtung bewegt und dann seine Richtung umkehrt, um neben der zuvor aufgeschmolzenen Pulverschicht zurückzukehren. Durch diese Umkehrfolge wird unmittelbar dort der Laserstrahl entlanggeführt, wo das aufgeschmolzene und verfestigte Pulvermaterial noch stark aufgewärmt ist. Eine solche maximale Abtastvektorlänge sollte auf 20 mm, vorzugsweise auf maximal 10 mm, eingestellt werden, d. h. der Laser überstreicht nur eine sehr kurze Strecke, bevor er seine Richtung umkehrt, um parallel zu seiner letzten Spur abzutasten. Eine solche Unterteilung jeder Schicht in einzelne Teilstücken und diese wiederum in einzelne Abtastvektorzonen einer vorgegebenen Länge kann im Rahmen der Datenverarbeitung durchgeführt werden, d. h. ein Datenverarbeitungssystem unterteilt die Flächen derart, daß der Laserstrahl keine Sprünge in der Schmelzebene vornehmen muß, sondern fortlaufend die gesamte Schicht nach und nach durchläuft, um möglichst optimiert die Restwärme, die in den bereits aufgeschmolzenen Schichten noch verblieben ist, zu nutzen.

Weiterhin sollte bevorzugt beachtet werden, daß die maximale Abtastvektorlänge kleiner ist als die Breite der Teilstücke in Abtastrichtung des Laserstrahls, d. h. der Laserstrahl tastet quer zu seiner Abtastrichtung lange, streifenförmige Teilstücken der Pulverschicht ab und schmilzt diese Bereiche auf.

Um die Einkopplung des Laserstrahls in die Pulverschicht zu unterstützen, sollte der Laserstrahl unter einem Winkel zur Flächennormalen der Pulverschicht, vorzugsweise unter einem Winkel von etwa  $45^\circ$ , eingeschossen werden. Durch diese Maßnahme erfolgt eine tiefere Eindringung des Laserstrahls bei gleicher Laserleistung in das metallische Werkstoffpulver, als dies der Fall wäre, wenn der Laserstrahl parallel zur Flächennor-

malen der Pulverschicht eingestrahlt würde.

Um das Pulver gleichmäßig aufzuschmelzen derart, daß jeweils ausreichende Zonen des bereits erstarrten Metalls erneut aufgeschmolzen werden, um eine übergangslose Verbindung zu schaffen, werden die Metallpulverschichten vorzugsweise in einer Dicke zwischen 0,05 mm und 0,02 mm aufgebracht, mit einer bevorzugten Dicke von etwa 0,1 mm.

Die Abtastgeschwindigkeit des Laserstrahls sollte auf einen Wert zwischen 50 und 150 mm/s, vorzugsweise auf etwa 150 mm/s, eingestellt werden.

Die Körnung des metallischen Werkstoffpulvers sollte unterhalb 100 µm liegen mit einer bevorzugten, durchschnittlichen Korngröße der Körnung von 10 bis 50 µm.

Für die Energiedichte im Schmelzbereich sollten Werte zwischen 1 bis 3 J/mm<sup>2</sup> eingehalten werden; mit diesen Energiedichten werden gute Ergebnisse in Bezug auf Metalle, wie Stahl, Titan und Aluminium, erhalten.

Die Verbindung der Schmelzen der festen Kontur und der Schmelzen des Pulvers wird oft durch Oxidationsschichten und Verunreinigungen auf der Oberfläche der Schmelzen verhindert. Deshalb sollte durch eine geeignete Schutzgasführung die Oxidation der Schmelze, insbesondere durch den Luftsauerstoff, vermieden werden, sowie Verunreinigungen aus der Atmosphäre um die Bearbeitungszone herum entfernt werden. Dazu wird während des Aufschmelzens des metallischen Werkstoffpulvers über der Oberfläche des sich aufbauenden Formkörpers eine laminare Schutzgasströmung aufrechterhalten. Als Schutzgas kann zum Beispiel Stickstoff, Helium oder Argon verwendet werden. Eine ausreichende Strömung ist erforderlich, um nicht nur die sich im Bereich der Oberfläche befindlichen Gase, die eine Oxidation der entsprechenden Metalloberflächen bewirken könnten, sondern auch solche Gase, die in den Hohlräumen zwischen dem metallischen Werkstoffpulver eingelagert sind, zu entfernen. Diese Gase werden dann ständig mit dem vorbeiströmenden Schutzgas abtransportiert, insbesondere auch dann, wenn diese Gase durch die Erwärmung des metallischen Werkstoffpulvers freigesetzt werden. Die laminare Strömung hat weiterhin den Vorteil, daß das metallische Werkstoffpulver im Pulverbett nicht aufgewirbelt wird, was sich nachteilig auf den Aufbau des Formkörpers auswirken könnte. Um den gesamten Bereich des aufzubauenden Formkörpers mit Schutzgasen abzudecken, wird vorzugsweise das Schutzgas von der einen Seite des Formkörpers zugeführt und auf der anderen Seite, und zwar der gegenüberliegenden Seite des Formkörpers, abgeführt. Um den Schutzgasmolenstrom einerseits zu begrenzen und andererseits die laminare Strömung zu definieren, wird das Schutzgas in einem eng begrenzten Volumen oberhalb des aufzubauenden Formkörpers, vorzugsweise in einem Bereich von maximal 20 mm oberhalb des Formkörpers, aufrechterhalten. Das Schutzgas sollte unter einem Überdruck von größer 0,1 MPa, vorzugsweise im Bereich von 0,2 bis 0,6 MPa, gehalten werden. Gegebenenfalls besteht auch die Möglichkeit, die Schutzgasströmung im Bereich der jeweiligen Aufschmelzstelle mittels einer Düse aufrechtzuerhalten; eine solche Düse kann dann mit der Bewegung des Laserstrahls oder von Teilfläche zu Teilfläche mitgeführt werden; es besteht auch die Möglichkeit, innerhalb der Teilfläche quer zu der Abtastvektorrichtung zu verfahren.

Weitere Einzelheiten des erfundengemäßen Verfahrens sowie eine Vorrichtung zur Durchführung des Ver-

fahrens ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung von Ausführungsbeispielen anhand der beigefügten Zeichnungen. In der Zeichnung zeigt

Fig. 1 eine schematische Darstellung einer Vorrichtung zum Herstellen eines Formkörpers gemäß dem erfundengemäßen Verfahren,

Fig. 2 eine schematische Darstellung des Spurabstands des Laserstrahls in einer Draufsicht, wobei ein Teil der Pulverschicht aus metallischem Werkstoffpulver aufgeschmolzen ist, während im Bereich des anderen Teils die Metallpulverkörnung sichtbar ist,

Fig. 3A bis 3C drei aufeinanderfolgende Darstellungen der Erzeugung einer schmelzmetallurgischen Verbindung zwischen einer festen Kontur und aufgeschmolzenem Pulver,

Fig. 4 ein Bauteil, bei dem eine Teilfläche des Bauteils in Abtastvektorlängen für den Laserstrahl unterteilt ist,

Fig. 5 einen Querschliff eines gemäß dem erfundengemäßen Verfahren hergestellten Probeteils aus Edelstahl,

Fig. 6A eine schematische Seitenansicht einer Vorrichtung, um die Gasströmung in der Prozeßkammer zu erläutern,

Fig. 6B eine Draufsicht auf die Vorrichtung der Fig. 6A,

Fig. 7A eine der Fig. 6A entsprechende Vorrichtung, bei der eine Gasströmung mit einer Gasdüse erzeugt wird, und

Fig. 7B eine Draufsicht auf die Vorrichtung der Fig. 7A.

Die Vorrichtung, die zur Durchführung des erfundengemäßen Verfahrens eingesetzt wird, umfaßt, wie in Fig. 1 dargestellt ist, eine Prozeßkammer 1 mit einem Schutzgaseinlaß 2, der im Bereich der oberen Seitenkante der Prozeßkammer 1 angeordnet ist, sowie einen Schutzgas-Auslaß 3 an der gegenüberliegenden Kante, der im Bereich der Bodenfläche 4 der Prozeßkammer 1 angeordnet ist. Der Bodenfläche 4 der Prozeßkammer 1 ist zum einen ein Vorratsbehälter 5, der mit metallischem Werkstoffpulver 6 gefüllt ist, sowie eine Aufbaukammer 7 zugeordnet. In jeder Kammer 5, 7 ist jeweils ein Hubtisch 8, 9 angeordnet, die über jeweils einen Hubkolben 10 in Richtung der Doppelpfeile in der z-Richtung bewegbar sind. Oberhalb der Prozeßkammer 1 im Bereich der Aufbaukammer 7 ist eine Abtasteinrichtung 11 angeordnet, die eine von einem Laser 12 erzeugten Laserstrahl 13 auf den Hubtisch 9 hin richtet. Der Laser 12, die Abtasteinrichtung 11, eine Pumpe 25 für die Schutzgaszufuhr zu dem Schutzgas-Einlaß 2 sowie eine Antrieseinrichtung 14 für die beiden Hubkolben 10 sind über jeweilige Steuerleitungen, die nicht mit einem Bezugszeichen versehen sind, einer zentralen Verarbeitungseinheit 15 zugeordnet.

Um einen Formkörper, beispielsweise den Prototyp, eines Bauteils 16 herzustellen, werden zunächst über eine Eingabeeinheit 17 die Bauteilkordinaten in die zentrale Verarbeitungseinheit 15 dreidimensional eingegeben, und zwar in einzelne, in z-Richtung unterteilte Schnitte. Die Schnitte sind in der z-Richtung durch das Bauteil 16 unter einer Beabstandung von 0,1 mm gelegt, so daß sich beispielsweise für ein Bauteil mit einer Bauhöhe in z-Richtung von 10 cm 1000 Schnitte ergeben. Nachdem die Bauteildaten entsprechend aufbereitet sind, wird der Hubtisch 9 in der Aufbaukammer 7 in eine erste, obere Stellung verfahren, in der die Auflagefläche 18 auf das Niveau der Bodenfläche 4 verfahren ist. Der Hubtisch 8 des Vorratsbehälters 5 wird in die untere Position verfahren, beispielsweise in eine Position, wie

sie in Fig. 1 gezeigt ist, und in den Vorratsbehälter 5 wird ein feinkörniges Pulver 6 aus dem Metall eingefüllt, aus dem das Bauteil 16 aufgebaut werden soll. Die Körnung des Pulvers 6 sollte im Bereich von 10–100 µm liegen, wobei die exakte Korngröße von den Bauteil-Vorgaben abhängig ist. Über eine Nivelliereinrichtung 19, in Fig. 1 schematisch mit einem Pfeil dargestellt, wird das metallische Werkstoffpulver 6, das über die Bodenfläche 4 hinaus mittels des Hubtisches 8 angehoben ist, über die Bodenfläche 4 der Prozeßkammer 1 verteilt, indem diese Nivelliereinrichtung 19 in Richtung des Pfeils 20 verfahren wird, um so eine dünne Schicht an metallischem Werkstoffpulver, wie oberhalb der Bodenfläche 4 zu sehen ist, zu verteilen. Die Nivelliereinrichtung 19, die ebenfalls mit der zentralen Verarbeitungseinheit 15 in Verbindung steht, wird in einem Abstand oberhalb der Bodenfläche 4 angehoben, die einer auftreibenden Schicht des Bauteils 16 entspricht. Wie ersichtlich ist, ist oberhalb des Hubtisches 9 dann ebenfalls eine dünne Pulverschicht aufgebracht. Nachdem diese vorbereitende Maßnahme abgeschlossen ist, werden der Laser 12 und die Abtasteinrichtung 11 angesteuert, um den Laserstrahl 13 auf die Auflagefläche 18 bzw. das darauf befindliche metallische Werkstoffpulver zu richten, um, entsprechend den Koordinaten, dasjenige Pulver aufzuschmelzen, das der untersten Schicht des Bauteils 16 entspricht. Hierbei wird der Laserstrahl 13, wie in Fig. 2 gezeigt ist, entlang aufeinanderfolgender Spuren n in der x-Richtung verfahren, um das metallische Werkstoffpulver 6 aufzuschmelzen, wie auch in Fig. 3A gezeigt ist. Nachdem die unterste Schicht s des Bauteils 16 gebildet ist, wird der Hubtisch 9 um einen Abstand Δz nach unten verfahren, so daß die Oberseite dieser ersten Schicht S wiederum in etwa der Ebene der Bodenfläche 4 der Prozeßkammer 1 liegt. Danach wird wiederum die Nivelliereinrichtung 19 betätigt, um eine definierte Pulverschicht auf die darunterliegende Schicht S des Bauteils 16 aufzutragen. Danach wird der Laserstrahl 13 wieder Spur für Spur n entsprechend den Bauteilkordinaten über das Pulver geführt, um dieses aufzuschmelzen. Hierbei wird nicht nur das metallische Werkstoffpulver aufgeschmolzen, sondern auch die darunterliegende Oberfläche der Schicht S sowie die jeweils benachbarte Spur, d. h. in Fig. 2 überstreicht der Laserstrahl 13, der entlang der Spur n + 1 verfährt, auch die Spur n. Hierbei sollte der Laserstrahl, um das verfestigte Metall der angrenzenden Spur aufzuschmelzen, mit mindestens einem Drittel seines Durchmessers auch die vorherige Spur n überstreichen. Hierbei wird die Spur n angeschmolzen, wie in Fig. 3A dargestellt ist, sowie die darunterliegende Schicht S, so daß unterhalb des Laserstrahls ein Schmelzbereich, in Fig. 3B mit dem Bezugssymbol 21 bezeichnet, gebildet wird. Das aufgeschmolzene Pulver 6 verfestigt sich dann, wie in Fig. 3C dargestellt ist, mit dem Metall in der vorherigen Spur n zu einer homogenen Schicht. Diese Verfahrensweise wird wiederholt, bis das gesamte Bauteil 16 aufgebaut ist. Es ist ersichtlich, daß nicht nur zusammenhängende Flächen jeweils aufgebaut werden können, sondern auch dünne Stege, wie anhand des Bauteils 16 angedeutet ist.

Der Laserstrahl 13 sollte von der vorherigen Spur n, parallel zu der er verschwenkt wird, der Vorschrift  $2 > d_s/\Delta y_s > 1,5$  genügen, wobei  $d_s$  der Durchmesser des Laserstrahls ist und  $\Delta y_s$  der mittlere Spurabstand benachbarter Spuren bezeichnet. Bei einem Strahldurchmesser  $d_s = 0,35$  mm beträgt der Spurabstand  $\Delta y_s$  etwa 0,2 mm.

Typische Energiedichten, die mit dem Laserstrahl 13 auf das metallische Werkstoffpulver 6 aufgebracht werden, um dieses vollständig aufzuschmelzen, liegen beispielweise bei der Verarbeitung von Edelstahl im Bereich von  $2 \text{ J/mm}^2$ ; diese Energiedichte kann zum Beispiel mit einer typischen Laserleistung von ca. 100 W, einem Strahldurchmesser von ca. 0,3 bis 0,4 mm, einer Abtastgeschwindigkeit in Richtung der Achse x in Fig. 2 von ca. 140 mm/s und einer Pulverschichtdicke  $\Delta z$  von 0,1 mm erreicht werden.

Geeignete Laser für das Verfahren sind, in Abhängigkeit von den Strahlungsabsorptionseigenschaften des eingesetzten Pulvers, Nd:YAG-Laser, CO<sub>2</sub>-Laser und Diodenlaser.

Es hat sich gezeigt, daß die Absorption der Laserstrahlung 13 im metallischen Werkstoffpulver 6 wesentlich effizienter wird, wenn die Laserstrahlung 13 unter einem Winkel, vorzugsweise unter einem Winkel von etwa 45°, zu der Flächennormalen der Pulverschicht eingestrahlt wird, da durch die schräge Strahlzidenz die Laserstrahlung tiefer in die Pulverschicht eingekoppelt werden kann in Bezug auf diesen Winkel kann ein beliebiger Raumwinkel gewählt werden.

Eine wesentliche Maßnahme, um das metallische

Werkstoffpulver homogen, auch in Bezug auf die angrenzende Spur n und die darunterliegende Schicht s, aufzuschmelzen, ist der vorstehend erläuterte Spurversatz benachbarter Spuren n und n + 1. Hierbei trifft ein Teil des Laserstrahls 13 auf das Pulver 6 auf, während ein anderer Teil auf die feste Kontur der vorher bearbeiteten Spur n auftrifft. Der Anteil der Laserstrahlung 13, die auf die relativ glatte, schön feste Kontur der benachbarten Spur auftrifft, wird zu einem größeren Teil reflektiert, als derjenige Teil, der auf das Pulver auftrifft, das aufgeschmolzen werden soll. Damit der geringe, absorbierte Teil der Laserstrahlung dennoch ausreicht, die feste Kontur an der Oberfläche der benachbarten Spur n aufzuschmelzen, sollte die Temperatur der schon festen Kontur noch möglichst hoch sein, wenn die Laserstrahlung 13 darauf auftrifft. Dies wird dadurch erreicht, daß die Abtastvektorlänge begrenzt wird, d. h. der Laser wird nur einen relativ kurzen Weg entlang einer Spur n verfahren, bevor die nächste Spur n + 1 überstrichen wird. Bei langen Abtastvektoren vergeht nämlich eine bestimmte Zeit, bis eine Spur n + 1 bearbeitet ist. In dieser Zeit kann die gerade bearbeitete Spur n abkühlen. Wird dann die nächste Spur bearbeitet, ist die bereits bearbeitete Spur soweit abgekühlt, daß die darauf auftreffende Laserstrahlung nicht ausreichen kann, diese wieder anzuschmelzen. Wird die Abtastvektorlänge kurz gestaltet, verkürzt sich auch die Zeit, in der die gerade bearbeitete Spur abkühlen kann. Deshalb hat die Spur noch eine hohe Temperatur, wenn die nächste Spur, die unmittelbar benachbart der gerade bearbeiteten Spur ist, abkühlen kann. Dadurch reicht die darauf auftreffende Laserstrahlung aus, um die Oberfläche der schon festen Spur anzuschmelzen und die Schmelze des Pulvers kann sich damit verbinden, wie dies auch in den Fig. 3A bis 3C dargestellt ist. Unter den Parametern, die vorstehend angegeben sind, würde die maximale Abtastvektorlänge ca. 10 mm betragen. Zum Aufbau komplexer Geometrien wird eine Software benutzt, die jede Schicht s eines Bauteils in Teilflächen 22 zerlegt, wie in Fig. 4 dargestellt ist, die dann entsprechend den angedeuteten Abtastvektoren 23 Spur n für Spur n hin und her durch den Laserstrahl 13 überstrichen werden, wobei vorzugsweise unmittelbar am Ende eines Abtastvektors 23 die Richtung des Laserstrahls

umgekehrt wird, um entlang des nächsten Abtastvektors 23 zu verfahren.

In Fig. 5 ist ein Schliffbild eines nach dem erfindungsgemäßen Verfahren hergestellten Edelstahl-Bauteils gezeigt. Anhand der Fig. 5 ist zu erkennen, daß ein sehr homogener und dichter Körper gebildet ist mit nur sehr geringen Einschlüssen; die Dichte des Bauteils liegt bei etwa 99% der theoretischen Materialdichte.

Ein Problem, das beim Aufschmelzen der festen Kontur und des Pulvers auftreten kann, sind Oxidationen an der Oberfläche der Materialien, die einem solchen Aufschmelzen entgegenwirken. Aus diesem Grund wird über der Oberseite der Aufbaukammer 7 eine laminare Schutzgasströmung 24 erzeugt, wie durch die entsprechenden Pfeile in den Fig. 6A und 6B angedeutet ist. Dazu wird als Schutzgas zum Beispiel Stickstoff, Helium oder Argon über den Schutzgas-Einlaß 2, der in dem Fall der Fig. 6A und 6B schlitzförmig an der Querseite der Prozeßkammer 1 im oberen Bereich verläuft, zugeführt und auf der gegenüberliegenden Seite über den schlitzförmigen Schutzgas-Auslaß 3, im unteren Bereich, der nahe zu der Bodenfläche 4 der Prozeßkammer 1 liegt, abgesaugt, und zwar über die Pumpeinrichtung 25. Aufgrund des tiefliegenden Schutzgas-Auslasses 3 nahe zu der Bodenfläche 4 wird die Schutzgasströmung 24 sehr dicht über die Oberseite der Aufbaukammer 7 geführt. Hierdurch wird nicht nur oberhalb der Pulverschicht, die durch den Laserstrahl 13 aufgeschmolzen werden soll, eine reine Schutzgasatmosphäre aufrechterhalten, sondern es wird auch Luft, die in den Hohlräumen zwischen den Pulvern zurückgehalten wird, abgeführt. Um den Volumenstrom des Schutzgases gering zu halten, sollte die Prozeßkammer 1 sehr flach ausgebildet sein, d. h. sie hat eine Höhe 26 von nicht mehr als 20 mm. Ein typischer Volumenstrom des Schutzgases beträgt 35 etwa 60 l/min; der Druck in diesem Bereich sollte zwischen 0,2 und 0,6 MPa liegen.

Alternativ zu der Anordnung der Fig. 6A und 6B, um die laminare Schutzgasströmung oberhalb der Aufbaukammer 7 aufrechtzuerhalten, kann der Aufbau so modifiziert werden, wie dies in den Fig. 7A und 7B zu sehen ist. In dieser alternativen Ausführungsform wird die Schutzgasströmung 24 über eine Düse 27 auf die Aufschmelzstelle gerichtet. Diese Düse 27 erzeugt eine lokal begrenzte Schutzgasströmung 24 an der Aufschmelzstelle. Um den gesamten Bereich, über den das Pulver 6 aufgeschmolzen wird, mit Schutzgas anzuströmen, wird die Düse 27 mit dem Laserstrahl 13 jeweils mitbewegt. Falls die Breite der Düse größer als die maximale Abtastvektorlänge 23 ist, dann wird die Düse 27 innerhalb einer Teilfläche 22 nur senkrecht zu der Abtastrichtung mitbewegt, da parallel zu der Abtastrichtung der Aufschmelzbereich vollständig abgeschirmt wird. Auch auf diese Weise kann eine effektive, laminare Strömung unmittelbar oberhalb des mit dem Laserstrahl 13 gerade aufgeschmolzenen Bereichs erzielt werden, so daß eine Oxidation der Oberflächen, sowohl des Pulvers als auch der angrenzenden, bereits aufgeschmolzenen Flächen, unterbunden wird.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung eines Formkörpers, insbesondere eines Prototyps eines Produkts oder Bauteils, eines Werkzeugprototyps oder eines Ersatzteils, entsprechend dreidimensionalen CAD-Daten eines Modells des Formkörpers durch schichtweises Aufbauen aus pulverförmigem, me-

tallischem Werkstoff, bei dem nacheinander mehrere Pulverschichten übereinander aufgebracht werden, wobei jede Pulverschicht vor dem Aufbringen der nächstfolgenden Pulverschicht mit einem fokussierten Laserstrahl in einem vorgegebenen Bereich, der einem ausgewählten Querschnittsbereich des Modells des Formkörpers entspricht, auf eine vorgegebene Temperatur erhitzt wird und bei dem der Laserstrahl jeweils entsprechend den CAD-Querschnittsdaten des ausgewählten Querschnittsbereichs des Modells über die jeweilige Pulverschicht geführt wird, wodurch diese Pulverschicht an der darunterliegenden Schicht fixiert wird, dadurch gekennzeichnet, daß das metallische Werkstoffpulver als bindemittel- und flußmittelfreies metallisches Werkstoffpulver aufgebracht wird, daß es durch den Laserstrahl auf Schmelztemperatur erhitzt wird, daß die Energie des Laserstrahls so ausgewählt wird, daß das metallische Werkstoffpulver an der Auftreffstelle des Laserstrahls über seine gesamte Schichtdicke vollständig aufgeschmolzen wird, daß der Laserstrahl in mehreren Spuren über den vorgegebenen Bereich der Werkstoffpulverschicht so geführt wird, daß jede folgende Spur des Laserstrahls die vorherige Spur teilweise überlappt, und daß eine Schutzgasatmosphäre über der Wechselwirkungszone von Laserstrahl mit dem metallischen Werkstoffpulver aufrechterhalten wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß ein Spurabstand  $\Delta s$  benachbarter Laserstrahlen gemäß der Vorschrift  $2 > d_s/\Delta s > 1,5$  eingehalten wird wobei  $d_s$  der Durchmesser des Laserstrahls in der Schmelzebene ist.

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß der Durchmesser des Laserstrahls im Bereich von 0,2 bis 0,5 mm eingestellt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß der Durchmesser des Laserstrahls auf maximal 0,35 mm eingestellt wird.

5. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß jede Schicht des schichtartigen Aufbaus in Teilflächen unterteilt wird, wobei jede Teilfläche wiederum in Abtastvektorlängen unterteilt wird, die der Laserstrahl nacheinander überstreicht.

6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die maximale Abtastvektorlänge auf 20 mm eingestellt wird.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die maximale Abtastvektorlänge auf etwa 10 mm eingestellt wird.

8. Verfahren nach Anspruch 5 oder 6, dadurch gekennzeichnet, daß die einzelnen Abtastvektorlängen von dem Laserstrahl mit einer Hin- und Herbewegung abgearbeitet werden.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Laserstrahl unter einem Winkel zur Flächen normalen der Pulverschicht eingestrahlt wird.

10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß der Laserstrahl unter einem Winkel von etwa  $45^\circ$  zur Flächennormalen der Pulverschicht eingestrahlt wird.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß die jeweilige Pulverschicht aus metallischem Werkstoffpulver mit einer Dicke zwischen 0,05 mm und 0,2 mm aufgebracht wird.

12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die jeweilige Pulverschicht aus metallischem Werkstoffpulver mit einer Dicke von etwa 0,1 mm aufgebracht wird.
13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß die Abtastgeschwindigkeit des Laserstrahls auf einen Wert zwischen 50 und 250 mm/s eingestellt wird.
14. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Abtastgeschwindigkeit des Laserstrahls auf einen Wert von etwa 150 mm/s eingestellt wird.
15. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß im Schmelzbereich eine Energiedichte im Bereich von 1 bis 3 J/mm<sup>2</sup> erzeugt wird.
16. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 15, dadurch gekennzeichnet, daß während des Aufschmelzens über der Oberfläche des sich aufbauenden Formkörpers eine Schutzgasströmung aufrechterhalten wird.
17. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 16, dadurch gekennzeichnet, daß das Schutzgas von der einen Seite des Formkörpers zugeführt und auf der anderen Seite des Formkörpers abgeführt wird.
18. Verfahren nach einem der Ansprüche 16 oder 17, dadurch gekennzeichnet, daß die Schutzgasströmung in einem eng begrenzten Volumen oberhalb des aufzubauenden Formkörpers aufrechterhalten wird.
19. Verfahren nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, daß die Schutzgasströmung in einem Bereich maximal 20 mm oberhalb des aufzubauenden Formkörpers aufrechterhalten wird.
20. Verfahren nach einem der Ansprüche 16 bis 19, dadurch gekennzeichnet, daß das Schutzgas unter einem Überdruck von größer 0,1 MPa gehalten wird.
21. Verfahren nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, daß das Schutzgas unter einem Überdruck von 0,2 bis 0,6 MPa gehalten wird.
22. Verfahren nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, daß die Schutzgasströmung im Bereich der jeweiligen Aufschmelzstelle mittels einer Düse aufrechterhalten wird, wobei die Düse mit der Bewegung des Laserstrahls mitgeführt wird.
23. Verfahren nach Anspruch 22, dadurch gekennzeichnet, daß das metallische Werkstoffpulver mit einer Körnung von < 100 µm aufgebracht wird.

50

---

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

55

60

65

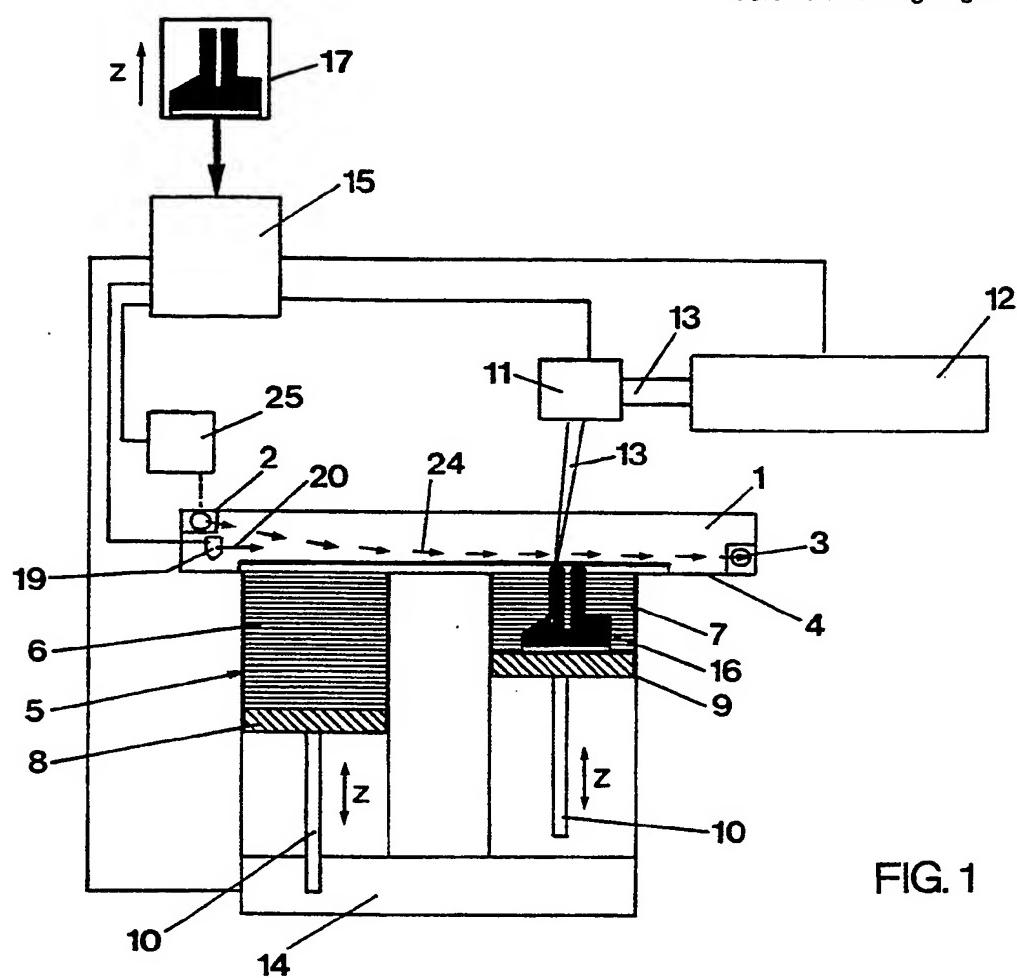


FIG. 1

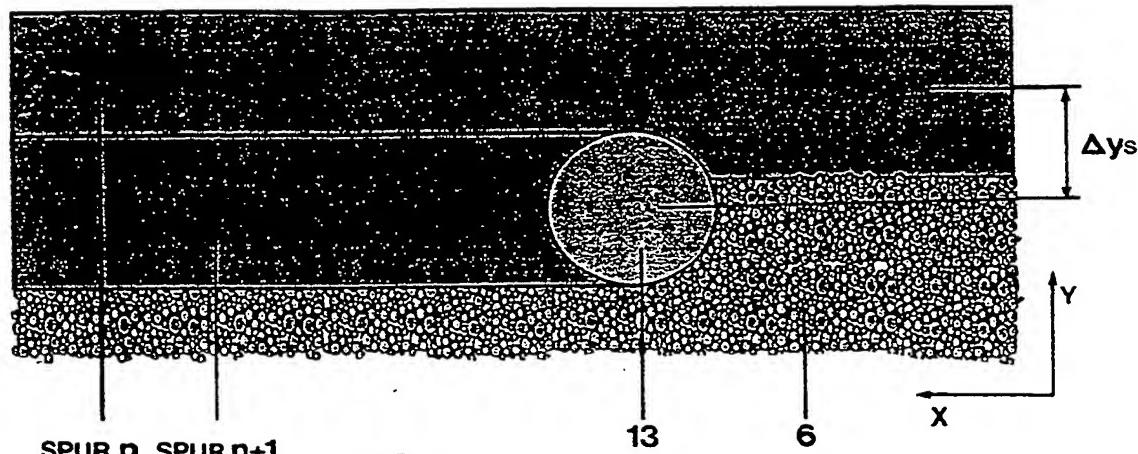


FIG. 2

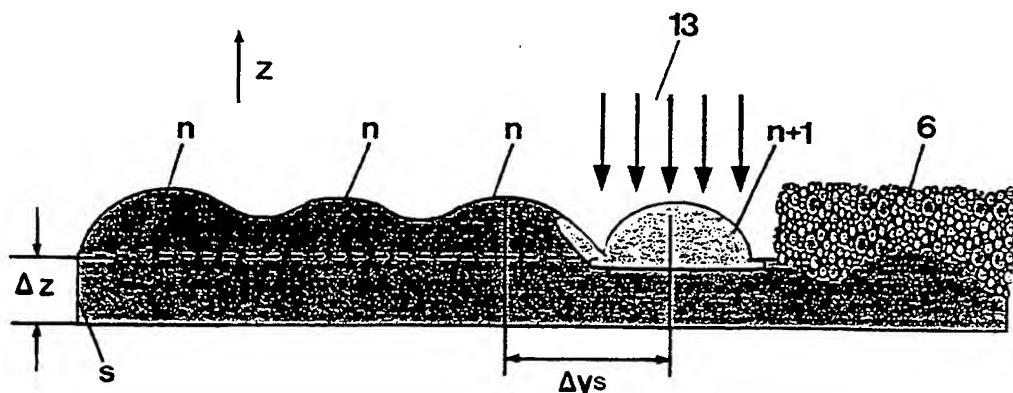


FIG. 3A

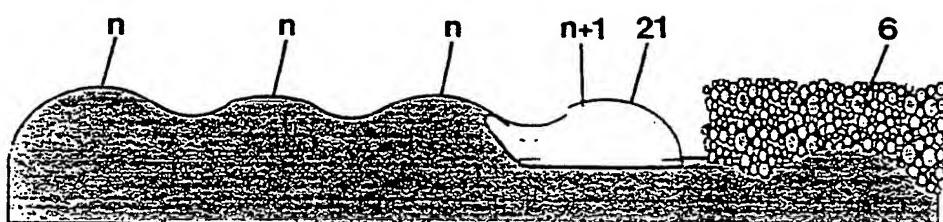


FIG. 3B

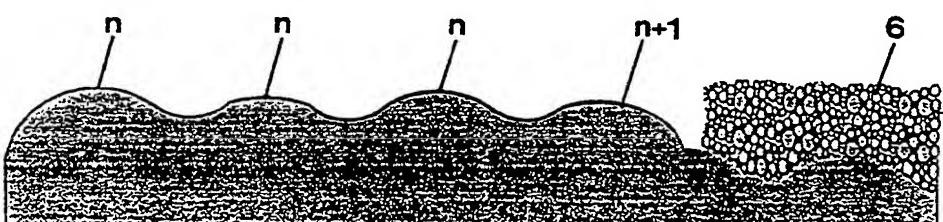


FIG. 3C

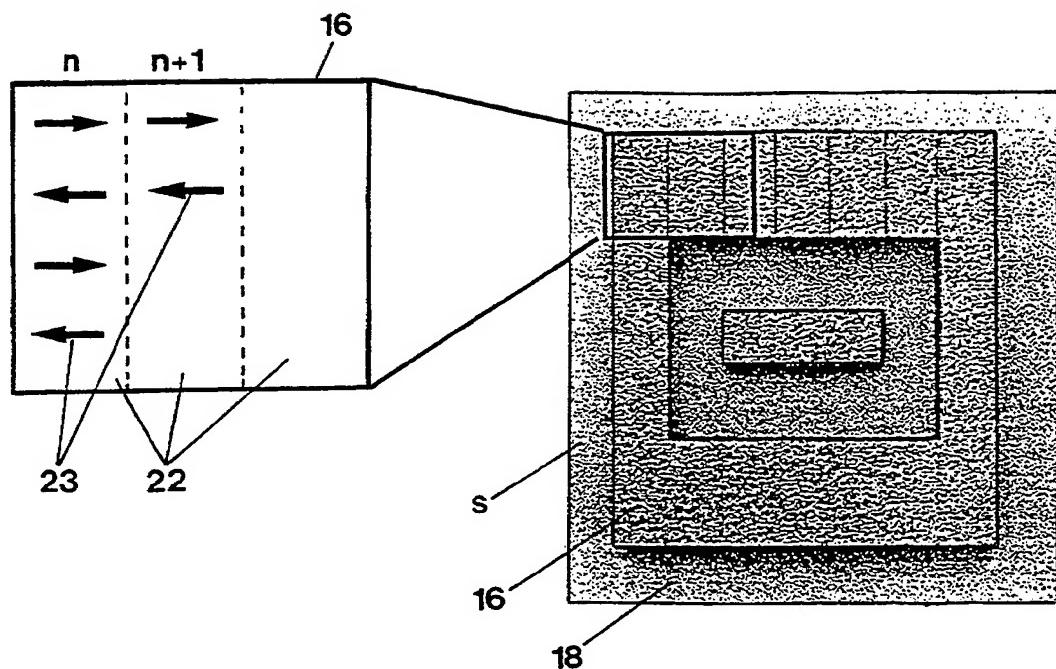


FIG.4

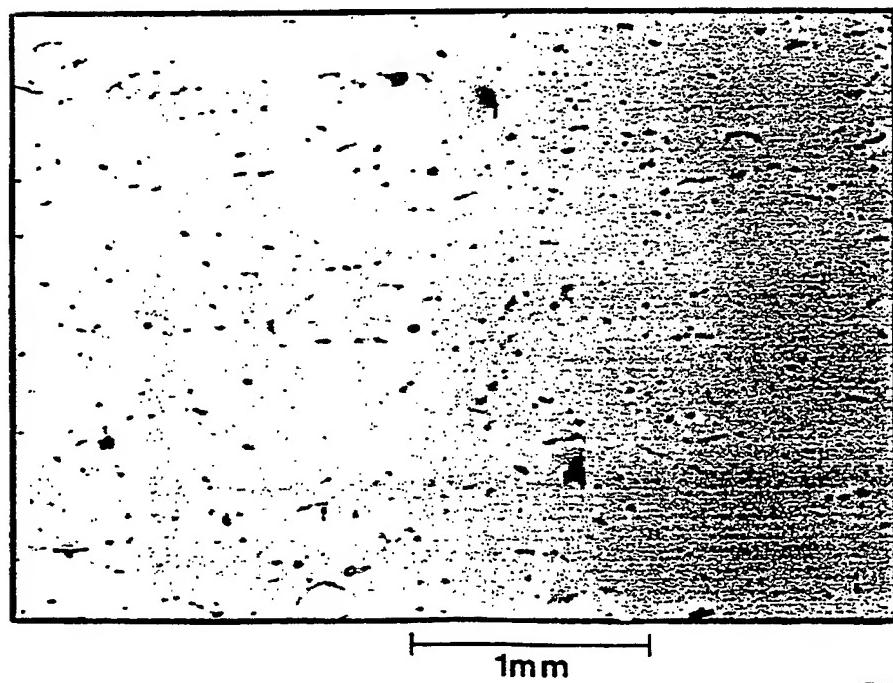


FIG.5

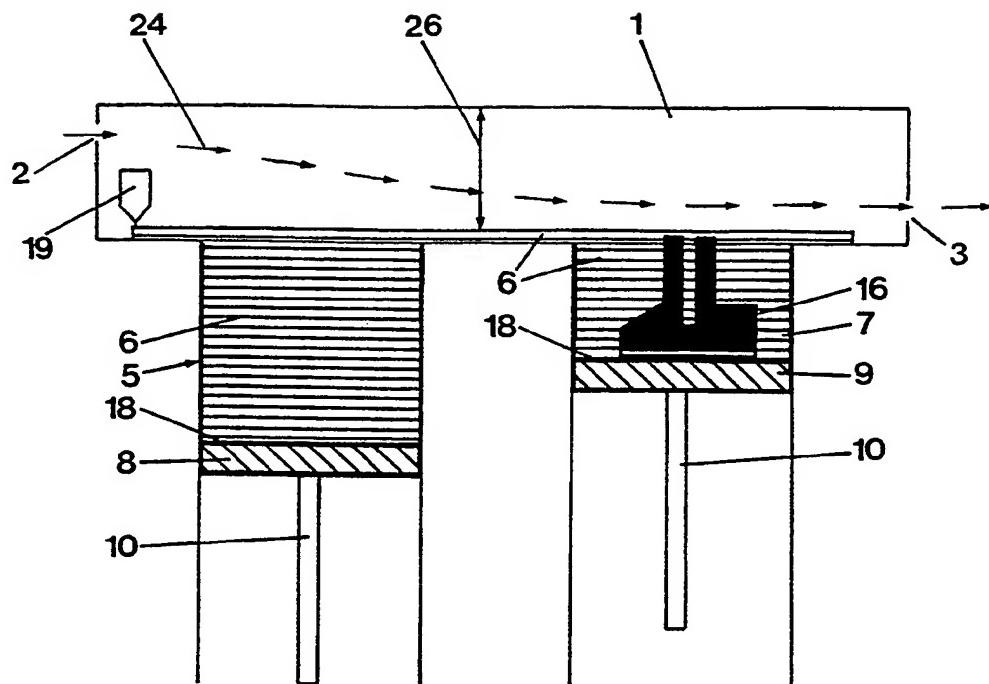


FIG. 6A

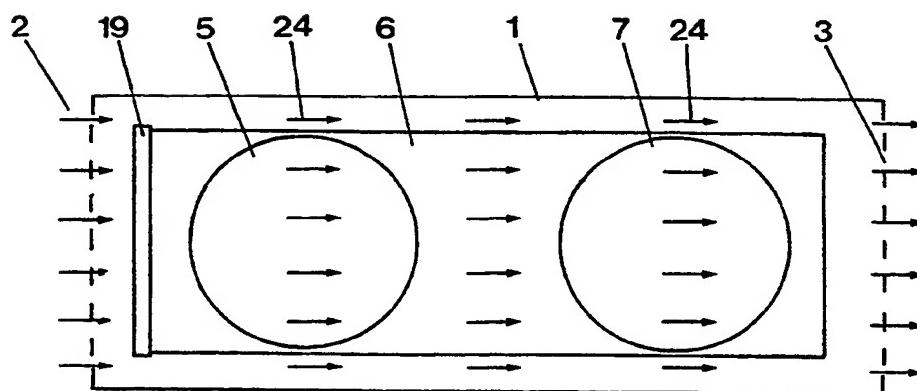


FIG. 6B

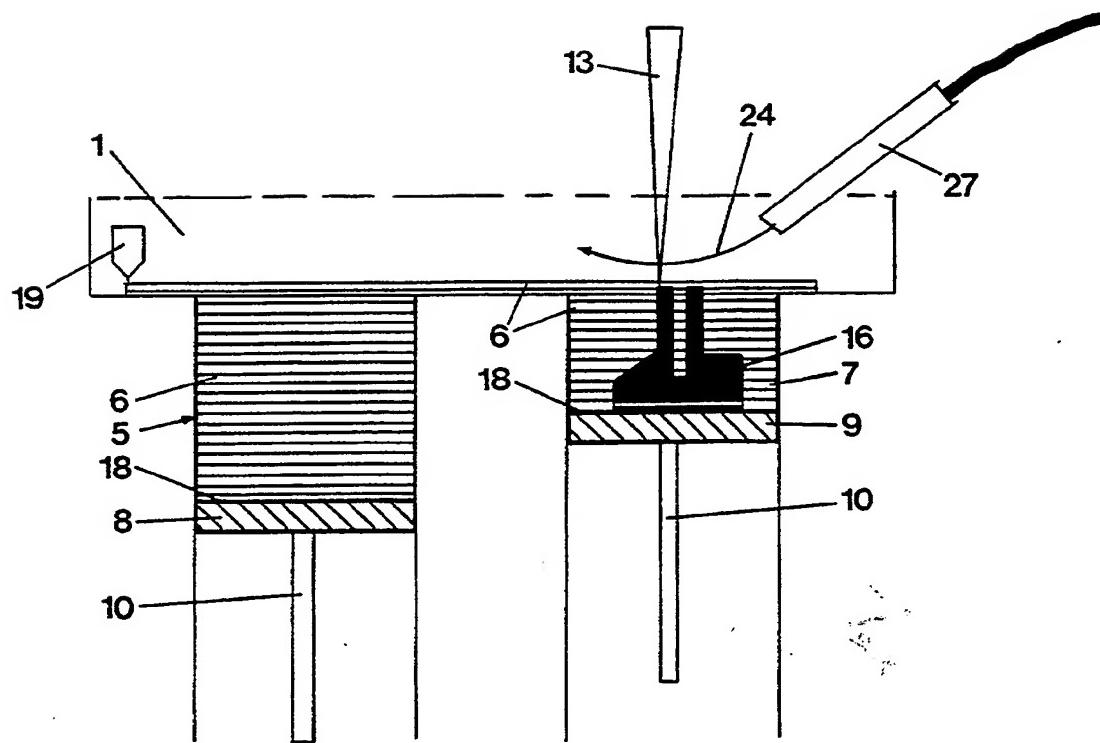


FIG. 7A

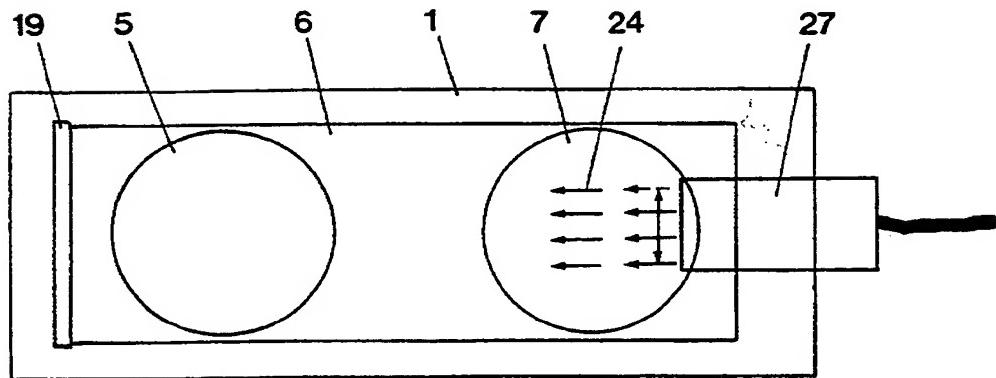


FIG. 7B